

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.03.014

关于改善光纤环绕线机成环质量的方法研究

杨纪刚, 毕聪志, 李丽坤, 徐广海

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 光纤环制作的核心工艺就是光纤线圈的绕制, 针对光纤环绕线机中存在的张力控制不对称性问题, 提出了一种基于布里渊光时域分析方法检测光纤线圈应力分布状态, 从而回馈和指导绕线机张力调整的方法。实验结果表明, 以上方法明显改善了光纤环的应力分布状态, 有效提高了光纤环成环后的质量, 对提高光纤陀螺的精度起到了重要作用。

关键词: 光纤陀螺; 光纤环; 张力; 应力

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)03-0083-04

Research on the Method of Improving the Production Quality of Winding Machine for Fiber Coil

YANG Ji-gang, BI Cong-zhi, LI Li-kun, XU Guang-hai

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The key technique in fabrication process of fiber ring is the winding of fiber coil. Aiming at the unbalance of the tension control in winding machine for fiber ring, an adjusting method for the tension control is put forward based on Brillouin optical time domain analysis method on detecting the stress distribution of fiber coil. The experimental results show that these ways have effectively improved the stress distribution of fiber coil and the quality of fiber coil, which plays an important role in improving the precision of FOG.

Key words: FOG; Fiber coil; Tension; Stress

0 引言

光纤陀螺作为一种新型的全固态惯性仪表^[1], 具有耐冲击、可靠性高、结构简单、体积小、检测灵敏度和分辨率高、动态范围宽、启动时间短等特点^[2]。经过多年的研究和发展, 干涉式光纤陀螺完成了从实验室研发到工程化的过程, 中低精度的光纤陀螺已经商品化, 并在多领域内广泛应用^[3]。高精度光纤陀螺的开发和研制也进入成熟阶段, 已经开始工程化应用。目前, 国外的光纤陀螺研制水平领先于国内, 主要原因包括其起步时间远早于国内

的研制单位; 另外, 国外先进国家在材料加工与控制设备领域都相对国内有着绝对的优势。我国对于光纤陀螺的研制由于起步较晚、设备相对落后, 因而在光纤陀螺的研制方面仍然存在许多不足, 主要包括光纤材料性能、光纤环的绕制、光学器件的稳定性等方面。光纤环是光纤陀螺的核心敏感元件, 光纤环的温度性能已经成为限制高精度光纤陀螺工程化应用的瓶颈问题。而光纤环的温度性能主要取决于光纤环的绕制与灌封技术, 目前国内光纤环的绕制方法主要采用正交绕法^[4], 包括四极、八极、十六极, 但受绕线机自动化水平的限制, 所绕制

收稿日期: 2017-05-18; 修订日期: 2017-06-27

基金项目: 国防科工局基础研究项目(JCKY2013204B004)

作者简介: 杨纪刚(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高精度惯性器件方面的研究。E-mail: 786327235@qq.com

的光纤环的温度性能并没有完全体现出正交绕法理论上对于光纤环温度性能的改善程度。例如理论上八极绕法与四极绕法相比,或者四极绕法与二极绕法相比,其温度性能应当提高1倍,但实际成环后的结果,仅四极绕法相对二极绕法对光纤环温度性能的提高较为明显,而其他各极绕法受限于绕线机的控制水平而夹杂过多的人为干扰,导致最终成环的效果并没有明显的优异性。而对于绕线机的自动化控制水平则与研制绕线机的器件材料性能和自动化控制技术水平等有关,短时间内无法迅速得到提升。

本文基于以上现状,根据光纤环的成环工艺过程,提出了切实可行的改善光纤环成环质量的方法。通过应用高精度保偏光纤应力分析仪,检测光纤线圈绕制完成后的应力分布状态,对比光纤线圈中点两侧应力状态的不对称性,反馈调节绕线机2个供纤轮的张力平衡,形成绕线机—光纤线圈—应力分析仪—绕线机的闭环反馈调节机制。最终使绕线机的张力控制系统处于真正的平衡状态,保证绕制完成后光纤线圈中点两侧的应力状态保持对称平衡。以上方法使光纤环成环后的温度性能得到了有效提升,且该方法在当前条件下即可实施,具有非常高的实用价值。

1 布里渊分布式光纤传感技术

分布式光纤传感系统^[5]是一种本征型的光纤传感技术,利用外界因素改变光纤中光传播产生的特征参量,根据特征参量的变化反映外界因素的变化,实现对外界因素进行测量和数据传输的光纤传感器。分布式光纤传感技术具有传感合一,分布式测量的特点,可以对空间连续变量场进行测量。在光纤中三种主要的瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射皆可用于分布式测量^[6-8],目前利用布里渊散射的分布式光纤传感技术的测量精度最高,技术最为成熟。

布里渊散射分为自发布里渊散射和受激布里渊散射,基于受激布里渊散射^[9]的布里渊光时域分析技术(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)是目前分辨率最高、测量长度最长的分布式光纤传感技术。

BOTDA的原理^[10]是,在用于分布式检测的光纤两端分别射入光波频率固定的泵浦光和频率可调的连续光。当泵浦光在光纤中传播,受到外界环

境温度或应力扰动时,在扰动点产生的受激布里渊散射会发生一定比例的频移,如式(1)所示

$$\nu_A = \sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}} \quad (1)$$

式中, κ 为泊松比, E 为杨氏模量, ρ 为密度,同折射率一样,这些参数都是温度和应变的函数,将其表示成温度与应力的函数如式(2)所示

$$\nu_B(T,\epsilon) = \frac{2n_p(T,\epsilon)}{\lambda_p} \cdot \sqrt{\frac{[1-\kappa(T,\epsilon)]E(T,\epsilon)}{[1+\kappa(T,\epsilon)][1-2\kappa(T,\epsilon)]\rho(T,\epsilon)}} \quad (2)$$

将式(2)简化成布里渊中心频移与应力和温度的线性公式

$$\nu_B = C_{11}\Delta\epsilon + C_{12}\Delta T \quad (3)$$

而另一端射入的连续光通过调整频率,使其频率与受激布里渊散射频率一致时,连续光功率将被放大。通过探测器检测连续光频率与泵浦光的频率差,即可得到外界环境温度或应力扰动的大小。根据接收到受激布里渊散射与泵浦光发射的时间差即可得到扰动点的位置,实现分布式检测。其原理图如图1所示。

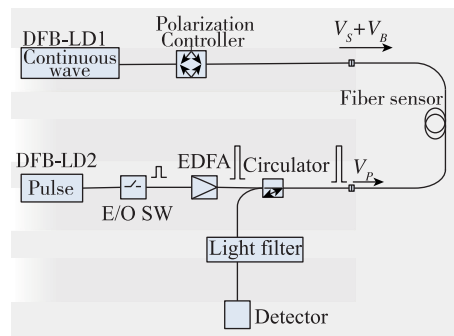


图1 BOTDA原理图

Fig. 1 The scheme of winding machine

本文以基于BOTDA^[11]的高精度保偏光纤应力分析仪作为主要检测设备。通过光纤环的应力分布状态研究和改善光纤环的质量。

2 绕线机张力控制不对称性问题分析

2.1 绕线机工作原理

以四极对称绕线机为例,如图2所示,光纤由中点对称绕在A、B 2个供纤轮上,然后分层交替为绕制光纤线圈的骨架提供光纤。绕线机的张力控制采用重力平衡张力轮(舞蹈轮平衡)控制方法,就是在由A或B供纤环向光纤环供纤缠绕过程中,依靠

舞蹈轮的重力控制光纤的张力。根据舞蹈轮轴臂角度的调整控制光纤缠绕到光纤线圈骨架上的张力,在张力控制系统中通过传感器在线检测光纤张力大小,并反馈控制稳定张力在设定值误差范围内。在光纤线圈绕制过程中,为了保证光纤环的互易性,必须要求 A、B 两供纤轮的张力参数设置一致,保证绕制完成后的光纤线圈中点两侧的光纤应力保持对称平衡。

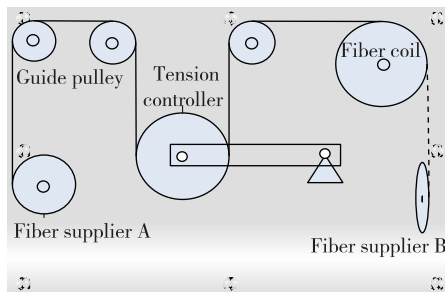


图 2 绕线机供纤示意图

Fig. 2 The scheme of fiber supplying system of winding machine

2.2 绕线机张力控制不对称性检测与分析

应用高精度保偏光纤应力分析仪,对绕线机绕制完成的光纤线圈的应力分布状态进行检测,以验证绕线机张力控制系统的状态。在绕线机 2 个供纤轮 A、B 的张力参数设置一致的情况下,随机抽取其中一个光纤线圈,图 3 所示为该光纤线圈的应力分布状态。

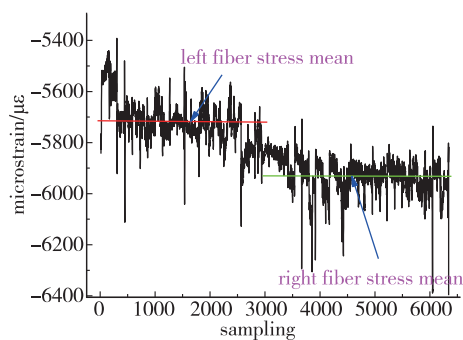


图 3 光纤线圈 1 应力分布曲线

Fig. 3 The stress distribution curve of fiber coil 1

图 3 中,红线表示光纤线圈中点左侧光纤应力均值,绿线表示光纤线圈中点右侧光纤应力均值。根据光纤线圈的应力状态可以发现,光纤线圈的中点左侧光纤应力均值为 $-5719.585\mu\epsilon$,右侧光纤应力均值为 $-5920.940\mu\epsilon$,应力差为 $201.355\mu\epsilon$ 。由此可以看出,绕线机在绕制光纤线圈的过程中,光

纤线圈中点左右两侧光纤的绕线张力有明显的差距,在绕制完成的光纤线圈中以应力值来判断,两侧光纤存在着一个约 $200\mu\epsilon$ 的稳定的应力差值。这种不对称性的存在对光纤环的温度性能具有非常大的影响,根据应变值与温度的对应关系, 1°C 的温度变化引起 $20\mu\epsilon$ 的变化。因此,由于绕线机张力控制系统的不对称性相当于光纤线圈中点左右两侧光纤处在 10°C 温差的环境状态下,虽然这仅是从应力状态方面的反向推导,且光纤线圈灌胶后的应力状态会有所改变,但这种不对称性对提高光纤环成环质量仍然是不容忽视的问题。

基于以上发现的问题,本文提出了一种根据应力分析仪测得的应力状态来反馈调节绕线机张力的方法。应用高精度保偏光纤应力分析仪对绕线机绕制完成的光纤线圈进行跟踪检测,根据其应力状态逐步调整绕线机的张力控制系统,形成如图 4 所示的闭环反馈调节机制。首先绕线机根据初始设定的张力控制参数绕制完成光纤线圈,然后光纤线圈交由应力分析仪检测应力分布状态。通过应力分布状态的对称性分析,得到光纤环中点两侧应力不对称性的程度,以此不对称性差值来调节绕线机张力控制系统。一般经过 2 次调整即可实现光纤环应力整体上的对称性;通过第一次的调整过程,可以得到该绕线机张力控制参数与光纤环成环后应力不对称性的对应比例关系,参考该比例系数,对绕线机左右供纤轮的张力控制参数进行相应比例的调整,可以实现光纤环整体对称性的提高。

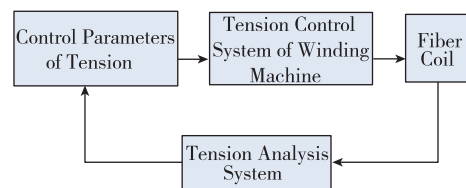


图 4 绕线机张力控制闭环反馈调节机制示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the closed loop feedback regulation mechanism for tension control of winding machine

2.3 实验结果分析

本文以图 3 所示光纤环的绕线机为实验对象,根据光纤线圈 1 的应力不对称性,对绕线机的张力控制系统进行调节。按照图 4 所示过程,经过 2 次调节以后,该绕线机绕制的光纤线圈的应力状态对称性得到了明显的改善。根据上述方法调节后,从

绕线机绕制的光纤线圈中随机抽取2个光纤线圈进行应力状态测试,其测试结果如图5、图6所示。从图中可以看出,经过对绕线机两侧张力调整后,绕制的光纤线圈中点两侧的应力均值基本处于同一水平,将该光纤环灌封固化后,进行装表测试,其整表性能与调整绕线机张力之前绕制的光纤环相比,也得到了一定程度的提高,表明了该方法对于改善光纤环性能的意义。但由于绕线机自身机械精密程度和控制水平的限制,光纤环的整体性能仍然存在一定的缺陷。对于不同的绕线机,其张力控制系统存在一定的差异,其冗余和参考基准也有所不同,应用以上方法分别对每一台绕线机进行张力控制系统调节,使绕线机的整体生产质量水平得到了提升。

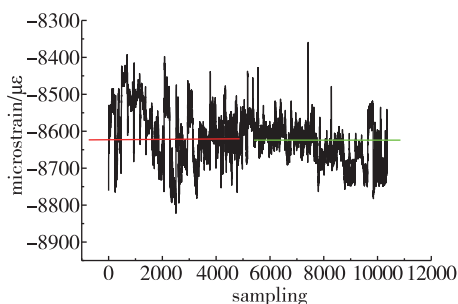


图5 光纤线圈2应力分布曲线

Fig. 5 The stress distribution curve of fiber coil 2

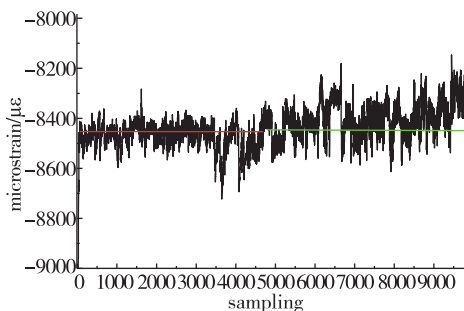


图6 光纤线圈3应力分布曲线

Fig. 6 The stress distribution curve of fiber coil 3

3 结论

本文通过实验检测,对当前光纤环成环工艺中光纤线圈绕制水平进行了重点研究,形成了一套通过应力分析仪作为反馈回路检测设备、调整绕线机张力稳定性的方法。经过该方法调整后,对绕线机绕制的光纤环进行整表测试,相比调整绕线机之前所绕制的光纤环,陀螺性能得到了一定程度的提高,

表明了该方法的有效性。在本文的研究过程中,发现的问题主要是,光纤环绕线机的机械结构老旧,精密匹配不足,张力控制系统落后,张力检测精度较低。从图5和图6可以看出,光纤线圈的各层光纤的应力存在较为明显的波动,直接在制作过程中加入了光纤环的非互易性,将严重影响光纤环的成环性能。但对绕线机的更新换代目前还不具备条件,接下来将对目前的温度时效处理方法进行深入的研究,探索更为有效的温度时效处理方法,以期在现有条件下,充分改善光纤环的成环质量。

参考文献

- [1] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(5): 1099-1100.
- [2] Lefever H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Norwood: Artech House INC, 1993.
- [3] 王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势[J]. *自动化学报*, 2013, 39(6): 723-729.
- [4] Frigo N J. Compensation of linear sources of non-reciprocity in Sagnac interferometers [C]// *Fiber Optic and Laser Sensors I*. Arlington: International Society for Optics and Photonics, 1983: 268-271.
- [5] 丁振扬, 姚晓天, 刘铁根, 等. 采用分布式偏振串扰检测保偏光纤环质量的研究[J]. *光电子激光*, 2010, 21(3): 430-434.
- [6] 孙世林, 周会娟, 孟洲. 光纤布里渊分布式温度应变同时传感研究进展[J]. *半导体光电*, 2013, 34(1): 6-11.
- [7] 张勇, 魏广庆, 施斌, 等. 基于BOTDR的传感光纤温度效应研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(10): 929-934.
- [8] 韩正英, 高业胜, 赵耀. BOTDA 光纤传感技术在光纤环圈质量评估中的应用[J]. *应用光学*, 2014, 35(4): 733-738.
- [9] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 834.
- [10] 杨纪刚, 毕聪志, 孙国飞. 光纤传感环圈骨架热应力仿真计算与实验研究[J]. *导航定位与授时*, 2016, 3(3): 65-73.
- [11] 杨纪刚, 毕聪志, 李丽坤, 等. 光纤环时效处理的有效性分析[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(4): 109-112.